



Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA  
Engenharia de Energia

# **Análise da viabilidade de sistema de gaseificação a bagaço de cana para produção de energia elétrica em estabelecimento comercial**

Autor: Karine Ximenes Cordeiro  
Orientador: Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF  
2018



Karine Ximenes Cordeiro

**Análise da viabilidade de sistema de gaseificação a  
bagaço de cana para produção de energia elétrica em  
estabelecimento comercial**

Monografia submetida ao curso de graduação  
em Engenharia de Energia da Universidade  
de Brasília, como requisito parcial para ob-  
tenção do Título de Bacharel em Engenharia  
de Energia.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF

2018

---

Karine Ximenes Cordeiro

Análise da viabilidade de sistema de gaseificação a bagaço de cana para produção de energia elétrica em estabelecimento comercial/ Karine Ximenes Cordeiro.  
– Brasília, DF, 2018-

42 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA , 2018.

1. Gaseificação. 2. Bagaço de cana. I. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise da viabilidade de sistema de gaseificação a bagaço de cana para produção de energia elétrica em estabelecimento comercial

CDU 02:141:005.6

---

Karine Ximenes Cordeiro

## **Análise da viabilidade de sistema de gaseificação a bagaço de cana para produção de energia elétrica em estabelecimento comercial**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 04 de julho de 2018 – Data da aprovação do trabalho:

---

**Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa**  
Orientador

---

**Dr. Augusto César de Mendonça**  
**Brasil**  
Convidado 1

---

**Dr. Fábio Alfaia da Cunha**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2018

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, Marcone e Amparo, e à minha irmã, Kléia, que  
são meu pilar na vida.*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por me guiar em todos os momentos, me levantando nos momentos difíceis, me presenteando com vitória e sucesso durante o percurso e com a oportunidade de fazer essa graduação.

Agradeço à minha família, meus pais e minha irmã, que são o que tenho de mais precioso, que sempre me apoiaram e foram meu pilar não só durante a graduação, mas por toda a vida.

Agradeço aos meus amigos, primos e tios pelo apoio emocional em todos os momentos difíceis, por todas as palavras amigas e por sempre acreditarem em mim.

Agradeço aos meus amigos da faculdade pela troca de conhecimento em todas as provas, trabalhos e momentos de estudo, ajudando no entendimento e aprendizagem dos conteúdos.

Agradeço ao meu professor orientador Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa pela orientação clara e motivadora, pelo conhecimento a mim transmitido, pela grande ajuda prestada, pela dedicação e paciência.

*O Senhor é meu Pastor e nada me faltará.*

# Resumo

Tendo em vista as recorrentes crises hídricas no Brasil, o alto percentual da participação das usinas hidrelétricas na oferta de energia elétrica brasileira e o crescente aumento da demanda energética no país, faz-se necessária uma diminuição na dependência que o país tem na energia hídrica. Como solução, pode-se investir no incentivo ao aumento do uso de fontes alternativas de energia renovável, como a biomassa, e o incentivo à geração distribuída. O bagaço de cana de açúcar é uma biomassa amplamente utilizada como fonte energética no território brasileiro e estabelecimentos comerciais, como comércios de caldo de cana, podem obter economia financeira com o aproveitamento energético desse resíduo advindo do seu processo produtivo. A fim de analisar a possibilidade desta economia, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade de um sistema de gaseificação, onde um motor de combustão interna é alimentado por um gás proveniente da gaseificação do bagaço de cana. O estudo experimental analisou a redução no consumo de combustível do motor e, de forma teórica, a geração de energia elétrica. O motor apresentou uma redução de 14,4% no consumo de gasolina com a inserção do gás de síntese e, considerando a potência térmica do syngas sem perdas, é capaz de gerar 4,8kW de potência operando a duplo combustível, o que torna sua aplicação tecnicamente viável. O sistema, porém, não é economicamente viável para geração distribuída de energia elétrica devido ao alto preço da gasolina.

**Palavras-chaves:** Gaseificação. Bagaço de cana. Geração de energia elétrica.



# Abstract

Given the current hydric crisis in Brazil, the high percentage of hydroelectric power plants participation in the Brazilian electrical energy supply and the increasing increase on the country's energetic demand, a decrease on the dependency of hydric energy becomes necessary. As a solution, there can be incentives on the usage increase of renewable energy alternative sources, like biomass, and incentives to decentralized generation. The sugarcane bagasse is a biomass widely used as an energetic source in Brazilian territory and commercial establishments that sells sugarcane juice can save financially with the energetic exploitation of this residue that comes from its own production process. In order to analyze the possibility of this savings, this work's goal is to analyze the feasibility of a gasification system, where an internal combustion engine is powered with the gas generated from the sugarcane bagasse's gasification. The experimental study analyzed the reduction on the engine's fuel consumption and, in a theoretical way, the electric energy generation. The engine showed a fuel consumption reduction of 14,4% by inserting the synthesis gas and, considering the syngas thermal power with no losses, it is capable of generating 4,8kW operating at dual-fuel mode, which makes its application technically viable. On the other hand, the system is not economically viable to a decentralized energy generation due to the gasoline's high price.

**Key-words:** Gasification. Sugarcane bagasse. Electrical Energy Generation.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte (MME, 2017) . . . . .	16
Figura 2 – Geração de energia elétrica por sistema de gaseificação a biomassa. (Fonte: autoria própria) . . . . .	19
Figura 3 – Gaseificadores de Leito Fixo. [a] Gaseificador Updraft. [b] Gaseificador Downdraft. [c] Gaseificador Crossdraft (MANDL, 2009) modificado . .	22
Figura 4 – [a] Gaseificador de Leito Fluidizado (KHAN, 2012)(modificado). [b] Gaseificador de Leito Arrastado (WANG, 2013)(modificado) . . . . .	23
Figura 5 – Método de remoção de alcatrão: Separador do tipo spray. (RENDEIRO, 2008) . . . . .	25
Figura 6 – Reator (Fonte: autoria própria). . . . .	28
Figura 7 – a) Resfriamento do gás e condensação do alcatrão. b) Alcatrão conden- sado. (Fonte: autoria própria). . . . .	29
Figura 8 – Entrada do gás de síntese no motor. (Fonte: autoria própria) . . . . .	29
Figura 9 – Biomassa preparada para gaseificação. (Fonte: autoria própria) . . . . .	30
Figura 10 – Consumo de Combustível . . . . .	34
Figura 11 – Gráfico das potências de eixo e elétrica. . . . .	35

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Caracterização do bagaço de cana segundo (LENÇO, 2010). . . . .	20
Tabela 2 – Poder calorífico do syngas baseado no agente oxidante (BASU, 2010) .	21
Tabela 3 – Resultados do experimento. . . . .	33
Tabela 4 – Cálculos realizados com os dados coletados. . . . .	35
Tabela 5 – Tabela de moendas de cana marca Maqtron (MAQTRON, 2016) . . . .	36
Tabela 6 – Resultados do motor utilizado . . . . .	37
Tabela 7 – Dados dos equipamentos elétricos da pastelaria. . . . .	37
Tabela 8 – Custos de energia com e sem o sistema de gaseificação. . . . .	38
Tabela 9 – Custos de energia com redução no consumo de gasolina. . . . .	39

# Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEB	Companhia Energética de Brasília
MME	Ministério de Minas e Energia
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
SIN	Sistema Interligado Nacional

# Lista de símbolos

MJ	MegaJoule
kg	kilograma
Nm <sup>3</sup>	Normal metro cúbico
$\mu$	micro
W	Watt
h	hora
s	segundo
kVA	kilovolt Ampère
Hz	Hertz
V	Volt
L	Litro
mm	milímetros
$\psi$	Taxa específica de processamento do reator
$\eta$	Eficiência
$\dot{m}$	Vazão mássica
$\dot{Q}$	Vazão Volumétrica
t <sub>i</sub>	Tempo de injeção
N	Rotação
C	Consumo
A <sub>g</sub>	Área da seção transversal
h <sub>b</sub>	Altura da coluna de biomassa
$\rho_{ap}$	Massa específica aparente
t	Tempo de consumo da biomassa

$P_t$	Potência térmica
$P_w$	Potência de eixo
$P_e$	Potência elétrica
cv	cavalo-vapor

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>18</b>
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Biomassa</b>	<b>19</b>
2.1.1	Caracterização da Biomassa	19
2.1.1.1	Análise imediata	20
2.1.1.2	Análise elementar	20
2.1.1.3	Poder Calorífico	20
<b>2.2</b>	<b>Gaseificação</b>	<b>21</b>
2.2.1	Gaseificador	21
2.2.1.1	Leito fixo	21
2.2.1.2	Leito Fluidizado e Leito Arrastado	23
2.2.2	Processo de gaseificação em gaseificador downdraft	23
<b>2.3</b>	<b>Sistema de limpeza do syngas</b>	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>Grupo Moto-gerador</b>	<b>25</b>
<b>2.5</b>	<b>Geração Distribuída</b>	<b>26</b>
<b>2.6</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>Aparato experimental</b>	<b>28</b>
<b>3.2</b>	<b>Procedimento Experimental</b>	<b>30</b>
<b>3.3</b>	<b>Consumo do motor</b>	<b>31</b>
<b>3.4</b>	<b>Análise energética teórica</b>	<b>31</b>
3.4.1	Poder Calorífico do gás de síntese	31
3.4.2	Potência do gás de síntese	31
3.4.3	Eficiência	32
3.4.4	Potência de eixo e Potência elétrica	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Consumo de Combustível</b>	<b>33</b>
<b>4.2</b>	<b>Geração de Energia</b>	<b>35</b>

4.3	Análise Financeira . . . . .	37
5	CONCLUSÃO . . . . .	40
	REFERÊNCIAS . . . . .	41



# 1 Introdução

A crescente demanda energética e a preocupação com os impactos ambientais advindos do uso de combustíveis fósseis como fonte de energia têm levado ao incentivo da inserção de fontes alternativas que sejam limpas e renováveis na matriz energética nacional de países em todo o mundo. O Brasil se destaca no cenário mundial por ter uma oferta interna de energia elétrica com ampla participação de fontes renováveis, as quais foram responsáveis por 81,7% da energia elétrica ofertada no ano de 2016 (MME, 2017). Na Figura 1, é possível visualizar o gráfico da Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte para o ano de 2016, segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME).

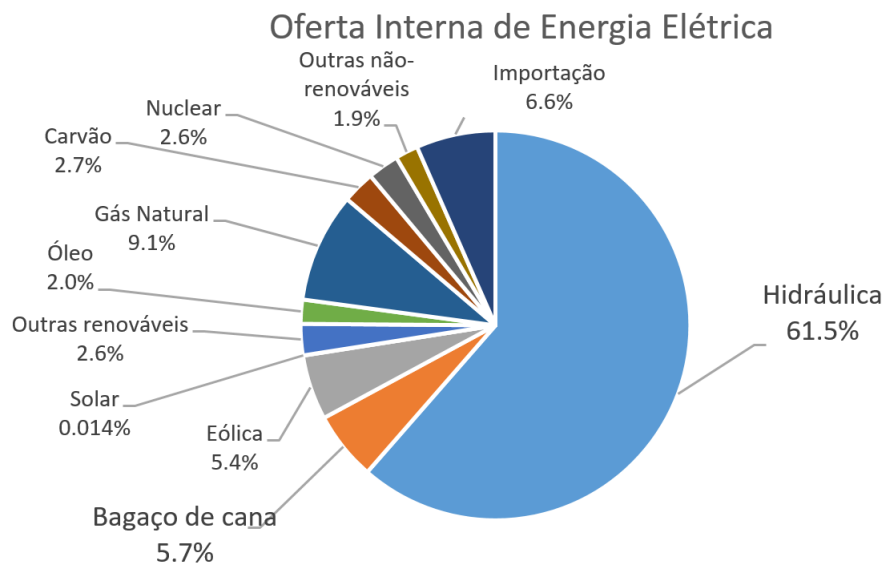


Figura 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte (MME, 2017)

Do total da oferta, 61,5% são provenientes da energia hídrica, o que torna a matriz energética nacional predominantemente limpa. O percentual das demais fontes renováveis somam 16,3%, ultrapassando o somatório das não renováveis que totalizam 15,6%. A energia solar, apesar de ter crescido em relação ao ano anterior, ainda apresenta baixa representatividade, a energia eólica, por outro lado, além do crescimento, apresenta significativa participação na matriz.

Dentre as biomassas, o bagaço da cana de açúcar é o principal responsável pela oferta de energia elétrica nacional, com um percentual de 5,7%. Sua principal aplicação acontece nas usinas sucroalcooleiras, que o usam em processos de cogeração de energia para a autossuficiência em energias térmica e elétrica, vendendo o excedente deste último para a rede do sistema elétrico nacional. Para esse processo de cogeração, o bagaço resultante da

moagem da cana para a obtenção de açúcar e álcool é queimado em uma caldeira e o calor resultante irá aquecer um fluido, geralmente água, gerando vapor que movimentará uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica. Outra forma de obtenção de energia elétrica através da biomassa se dá pelo processo de gaseificação, o qual transforma o combustível sólido em um gás de síntese, que movimentará um motor ou uma turbina acoplados a um gerador. A gaseificação apresenta vantagens sobre a queima direta da biomassa devido à maior eficiência de conversão energética (CHAVES, 2016).

Ao contrário do petróleo e seus derivados, a queima do bagaço de cana não é agressiva ao meio ambiente, uma vez que o  $\text{CO}_2$  emitido é absorvido pela própria plantação para o processo de fotossíntese da planta, sendo considerado, portanto, uma fonte de carbono-neutro (BASU, 2010).

## 1.1 Justificativa

Apesar de possuir uma fonte limpa, renovável e com recurso abundante no território brasileiro, a energia hídrica é extremamente dependente de fatores climáticos e meteorológicos. Em períodos de escassez de chuva, os reservatórios das usinas hidrelétricas acumulam baixas porcentagens do seu volume útil com água, o que afeta a geração de energia elétrica para o país. Portanto, é importante que haja um planejamento energético com a finalidade de reduzir a dependência do sistema elétrico brasileiro nas usinas hidrelétricas, bem como atenuar o efeito do crescimento da demanda energética no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Para isso, pode-se investir numa maior diversificação da matriz energética, aumentando o percentual das demais fontes alternativas limpas e renováveis, podendo ser elas solar, eólica, nuclear ou biomassa e no incentivo à geração distribuída, onde o consumidor gere sua própria energia perto do seu local de consumo, diminuindo a demanda do SIN.

Um estabelecimento comercial que utilize cana-de-açúcar no seu processo produtivo, como a moagem para venda de caldo de cana, tem como resíduo sólido o bagaço, que pode ser utilizado como insumo para geração de energia elétrica para o próprio estabelecimento. Além de contribuir para a diversificação da matriz energética nacional com uma fonte renovável, o estabelecimento estará agindo de forma ambientalmente correta ao reaproveitar um resíduo sólido resultante de seu processo produtivo, conforme os princípios e objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei N° 12.305, de 2 de agosto de 2010.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade de um sistema de gaseificação alimentado por bagaço de cana para geração distribuída de energia elétrica como aproveitamento energético do resíduo gerado em estabelecimentos que comercializem caldo de cana.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Utilizar bagaço de cana em um reator de gaseificação para obter a potência térmica do gás gerado;
- Acoplar o reator a um motor para realização da análise da redução no consumo de gasolina obtido com a inserção do gás de síntese;
- Avaliar a viabilidade técnica do sistema baseado na potência de eixo do motor;
- Avaliar a viabilidade econômica da inserção do sistema de gaseificação em um estabelecimento comercial baseado no custo das fontes energéticas.

## 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. No capítulo 2, encontra-se a fundamentação teórica onde se apresenta a teoria envolvida no processo de gaseificação de uma biomassa para geração distribuída de energia elétrica. No capítulo 3, encontra-se a metodologia utilizada, envolvendo a descrição do aparato experimental utilizado, o procedimento experimental e os aspectos teóricos para obtenção dos resultados. No capítulo 4, encontram-se os resultados obtidos com o estudo experimental e a análise dos mesmos e, com base nestes resultados e suas análises, encontra-se uma conclusão, no capítulo 5, tendo em vista o objetivo proposto.

## 2 Fundamentação Teórica

O processo de gaseificação de uma biomassa para geração de energia elétrica pode ser visto na Figura 2. Ele é basicamente dividido em três principais partes: a preparação da biomassa, envolvendo o pré-tratamento e secagem da mesma, sua gaseificação, envolvendo o processo dentro do gaseificador e a limpeza dos gases de saída e a geração de eletricidade para o consumidor final (CHAVES, 2016).

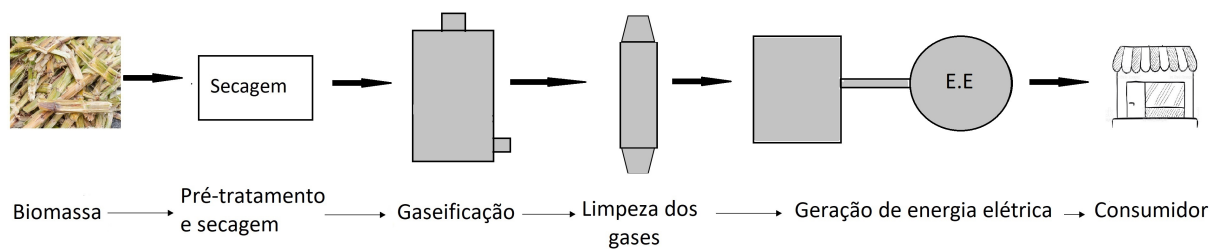


Figura 2 – Geração de energia elétrica por sistema de gaseificação a biomassa. (Fonte: autoria própria)

### 2.1 Biomassa

Biomassa é definida como qualquer material orgânico derivado de organismos vivos, plantas e animais, recentemente mortos, excluindo assim os materiais fósseis. É considerada uma fonte de energia sustentável e renovável por ser formada de uma interação constante de dióxido de carbono, ar, água, solo e luz do sol (BASU, 2010). Ela pode ser obtida de vegetais lenhosos, resíduos agrícolas, urbanos, industriais, animais e florestais (CORTEZ, 2009).

De acordo com a definição acima, o bagaço da cana é considerado uma biomassa e se encontra em resíduos agrícolas e resíduos industriais, pois é um resíduo tanto das atividades agrícolas brasileiras, como dos processos industriais do setor sucroalcooleiro (CORTEZ, 2009).

#### 2.1.1 Caracterização da Biomassa

A empregabilidade de uma biomassa como fonte em um sistema de geração de energia pode ser avaliada pelo potencial energético que a mesma contém, e para determinação de tal potencial, é necessário que se conheçam as propriedades químicas e térmicas da biomassa empregada, por meio das análises elementar, imediata e do seu poder calorífico.

### 2.1.1.1 Análise imediata

Com a análise imediata, obtém-se os valores percentuais de umidade (W), voláteis, carbono fixo e cinzas, baseando-se nas normas ASTM D 3172 a 3175, iniciando pela determinação do teor de umidade com a secagem da amostra em estufa a temperaturas entre 101°C e 110°C. As demais composições são determinadas elevando-se a temperatura a 750°C para as cinzas e 950°C para os voláteis, a diferença de peso registrada é o carbono fixo (SANCHEZ, 2010).

### 2.1.1.2 Análise elementar

Com a análise elementar, obtém-se os valores percentuais dos elementos que compõem a amostra, que são, principalmente, carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), mas também nitrogênio (N) e enxofre (S) em alguns casos, determinados com base na norma ASTM D-3.176. Esta análise é importante para a determinação do volume de ar necessário para a combustão e o poder calorífico do combustível (CORTEZ, 2009)

### 2.1.1.3 Poder Calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade de energia por unidade de massa liberada durante a combustão de um combustível e pode ser designado em poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). A diferença entre os dois é a energia requerida para vaporização da água presente no combustível. O PCS pode ser determinado experimentalmente com bomba calorimétrica baseado na norma ASTM D2015 ou analiticamente utilizando a fórmula empírica de Mendeleev (equação 2.1). O PCI é dado pela diferença entre o PCS e a umidade do combustível, segundo a equação 2.2.

$$PCS = 4,187[81C + 300H - 26(O - S)]kJ/kg \quad (2.1)$$

$$PCI = PCS - 25,12(W + 9H)]kJ/kg \quad (2.2)$$

A Tabela 1 mostra os resultados da caracterização do bagaço de cana baseado em vários autores em revisão da literatura feita por (LENÇO, 2010).

Tabela 1 – Caracterização do bagaço de cana segundo (LENÇO, 2010).

Análise Elementar		Análise Imediata		Poder Calorífico
C	45,65%	Carbono fixo Voláteis Cinzas		18,8 MJ/kg
H	5,98%		11,2%	
O	45,61%		85,6%	
N	0,26%		3,2%	
S	0,08%			

## 2.2 Gaseificação

Gaseificação é um processo termoquímico que converte um combustível sólido ou líquido em um gás através de oxidação parcial a temperaturas elevadas. A tecnologia consiste em suprir a reação com quantidades restringidas de oxidante, que pode ser oxigênio puro, ar atmosférico ou vapor d'água, produzindo gás de síntese (ou syngas), que é composto, basicamente, por monóxido de carbono, metano e hidrogênio (CORTEZ, 2009).

O gás de síntese, resultado da reação de gaseificação, pode ser aplicado na produção de combustíveis líquidos e na geração de energia mecânica e elétrica (CORTEZ, 2009). Seu poder calorífico é baseado, dentre outros fatores, no agente oxidante utilizado, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Poder calorífico do syngas baseado no agente oxidante (BASU, 2010)

Agente Oxidante	Poder Calorífico (MJ/Nm <sup>3</sup> )
Ar	4 - 7
Vapor d'água	10 - 18
Oxigênio puro	12 - 28

Esses valores têm significativa influência nas aplicações do syngas. Quando utilizados vapor e oxigênio como agente oxidante, o syngas apresenta um poder calorífico médio, sendo melhor utilizado na produção de combustíveis, já para a geração de energia elétrica através de motores e turbinas, pode-se utilizar o ar como agente oxidante, que produzirá um syngas com baixo poder calorífico (BRIDGWATER, 2003).

### 2.2.1 Gaseificador

Os gaseificadores são os equipamentos onde ocorre a gaseificação da biomassa, o processo ocorre em quatro zonas principais: secagem, pirólise, combustão e redução, esta ordem depende do tipo de gaseificador utilizado. Eles são classificados pela direção do movimento da biomassa e do agente oxidante, e podem ser divididos em três grupos: leito fixo, subdivididos em contracorrente (updraft), concorrente (downdraft) e fluxo cruzado (crossdraft), leito fluidizado e leito arrastado (HIGMAN;BURGT, 2007).

Os gaseificadores de leito fixo são os de mais simples construção, de maior empregabilidade e são aplicados em sistemas de pequena escala, enquanto os de leito fluidizado e leito arrastado são para média e alta escala, respectivamente (BASU, 2010).

#### 2.2.1.1 Leito fixo

Nos gaseificadores contracorrente (**updraft**), a biomassa desce pela ação da gravidade enquanto o agente oxidante segue o fluxo contrário. Possuem eficiência térmica elevada, uma vez que o agente oxidante vem por baixo passando primeiro pela zona de

combustão, onde está com mais elevada temperatura, pré-aquecendo a carga de combustível em seu fluxo ascendente. Porém, o syngas apresenta alto teor de alcatrão, que não passa por craqueamento na zona de combustão, o que pode causar incrustações e danos a equipamentos mecânicos e a tubulações, inviabilizando sua aplicação para produção de energia mecânica e elétrica sem um eficiente processo de limpeza do gás (SANCHEZ, 2010). São, portanto, mais adequados à aplicação para fornecimento de calor, como fornos e caldeiras. Também são ideais para biomassas com elevada umidade e concentração de cinzas (BASU, 2010).

Nos gaseificadores concorrentes (**downdraft**), o agente oxidante segue o mesmo fluxo da biomassa e é introduzido uniformemente na zona de combustão, região de alta temperatura, onde o alcatrão passa por craqueamento, resultando em um gás de síntese com significativo menor teor de alcatrão, tornando-o mais adequado para aplicações na geração de energia mecânica e elétrica. Porém, ao seguir para a zona de redução, o gás adquire maiores quantidades de cinza e fuligem (SANCHEZ, 2010).

Nos gaseificadores de fluxo cruzado (**crossdraft**), o ar é injetado diretamente no centro da zona de combustão, onde, no mesmo patamar, o syngas é retirado a uma velocidade muito rápida e temperaturas extremamente elevadas. São adequados à aplicação na geração de energia mecânica e elétrica por possuir rápida resposta à variação de carga, porém, não se adequam muito ao uso da biomassa por possuir alta sensibilidade à umidade (SANCHEZ, 2010).

Um exemplo de cada tipo dos gaseificadores de leito fixo pode ser visto na Figura 3

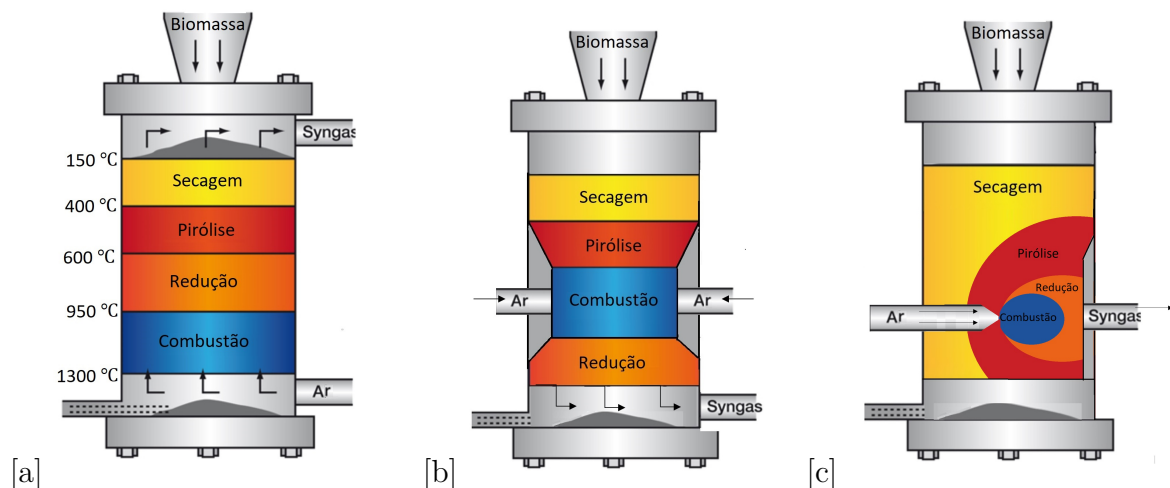


Figura 3 – Gaseificadores de Leito Fixo. [a] Gaseificador Updraft. [b] Gaseificador Downdraft. [c] Gaseificador Crossdraft (MANDL, 2009) modificado

### 2.2.1.2 Leito Fluidizado e Leito Arrastado

Nos gaseificadores de leito fluidizado, a biomassa é introduzida em toda a extensão do gaseificador com um material inerte suportados por uma placa distribuidora, o agente oxidante sobe pelo gaseificador de forma ascendente reagindo com a mistura (SANCHEZ, 2010) e com velocidade suficiente para fazê-la levitar e se espalhar pela grelha até atingir o topo onde a velocidade reduz e as partículas recirculam pela grelha causando alta transferência de massa e calor entre as partículas de combustível e o agente oxidante (REED, 1988).

Nos gaseificadores de leito arrastado, a biomassa e o agente oxidante seguem o mesmo fluxo dentro do gaseificador em poucos segundos. A biomassa é introduzida com um diâmetro igual ou inferior a  $100\ \mu\text{m}$  para que possa ser transportada pelo gás (HIGMAN;BURGT, 2007).

Exemplos de ambos gaseificadores podem ser vistos na Figura 4

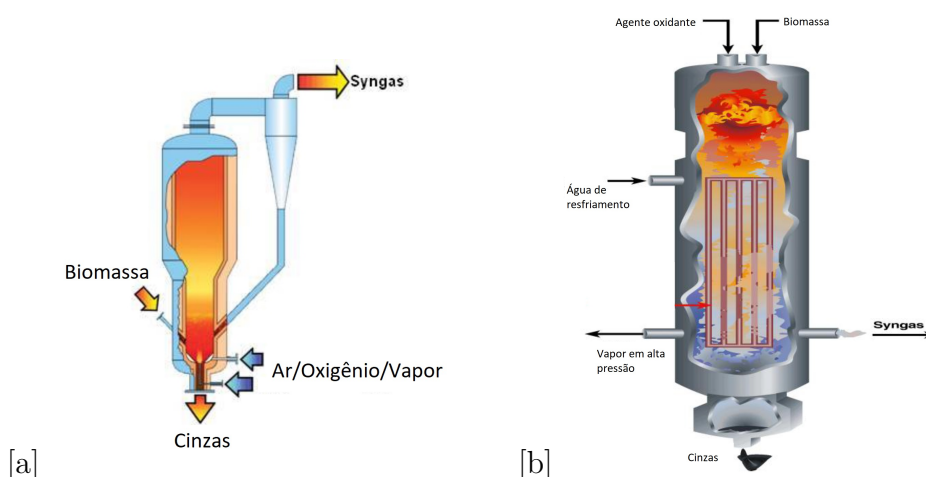


Figura 4 – [a] Gaseificador de Leito Fluidizado (KHAN, 2012)(modificado). [b] Gaseificador de Leito Arrastado (WANG, 2013)(modificado)

### 2.2.2 Processo de gaseificação em gaseificador downdraft

O teor de umidade da biomassa é um inconveniente para o processo de gaseificação, pois necessita-se de um mínimo de 2260 kJ para vaporizar 1 kg de água presente na biomassa (BASU, 2010). Além disso, para o bagaço de cana, quanto maior for o teor dessa umidade, menor é o seu poder calorífico, levando a um menor aproveitamento energético (SILVA;MORAIS, 2008). Dessa forma, é de suma importância que a amostra passe por um processo de secagem antes de ser introduzida no gaseificador.

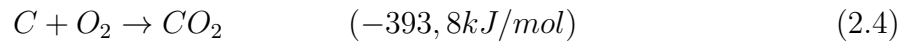
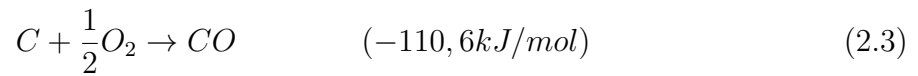
A biomassa introduzida passa por outro processo de secagem em temperaturas em torno de 100-500 °C, onde os valores esperados de umidade variam de 5% a 35%,



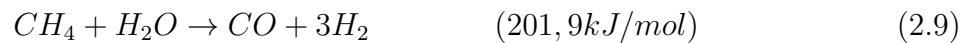
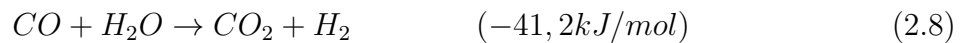
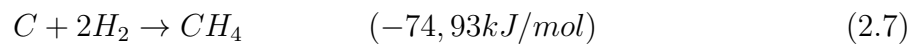
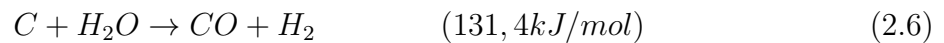
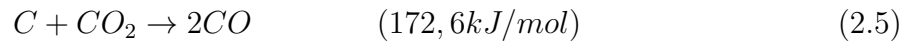
caso ultrapassados estes valores, o poder calorífico do syngas será reduzido, resultando em queda na eficiência da conversão (SUSASTRIAWN, 2017).

A biomassa segue para a zona de pirólise, onde as moléculas serão quebradas em moléculas menores entre as temperaturas de 500 – 700 °C, produzindo carbono, alcatrão e gases condensáveis (BASU, 2010).

O ar que entra na zona de combustão reage com o carbono produto da pirólise em reações exotérmicas entre 800 – 1400 °C provendo calor para os demais processos do gaseificador. As reações 2.3 e 2.4 são referentes às reações parcial e total, respectivamente, de oxidação do carbono que ocorrem na zona de combustão.



Na zona de redução ocorrem as principais reações de gaseificação, endotérmicas e exotérmicas, que são: a reação de Boudouard (equação 2.5), a reação heterogênea de gás-água (equação 2.6), a reação de formação do metano (equação 2.7) e as reações homogêneas de gás-gás, todas listadas abaixo (equações 2.8 e 2.9).



## 2.3 Sistema de limpeza do syngas

O syngas produzido, como pode ser visto pelas equações, é composto de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e metano, sua qualidade é determinada pelo processo de gaseificação adotado e pelas características físicas e químicas da biomassa (CHAVES, 2016).

Antes de ser encaminhado para o motor, o syngas deve ser previamente tratado devido à presença de alcatrão e cinzas. Para que o motor opere em condições satisfatórias, a concentração de alcatrão em um motor de combustão interna deve ser menor que  $100\text{mg}/\text{Nm}^3$  (HASLER;NUSSBAUMER, 1999).

Há dois métodos de remoção de alcatrão para limpeza dos gases, primário e secundário. No método primário, o gaseificador é modificado para redução da formação de alcatrão no gás, por exemplo, com a adição de uma segunda injeção de ar. No método secundário, o alcatrão é removido após sair do gaseificador, através de remoção física ou catalítica. A remoção física pode ser feita por ciclones, filtros de barreira, precipitadores eletrostáticos ou lavadores com água. Necessita-se que o alcatrão seja primeiramente condensado antes do processo de separação (BASU, 2010). Um exemplo de lavador com água pode ser visto na Figura 5.



Figura 5 – Método de remoção de alcatrão: Separador do tipo spray. (RENDEIRO, 2008)

## 2.4 Grupo Moto-gerador

Após o sistema de limpeza, o syngas segue para o grupo moto-gerador, que será responsável pela geração de energia elétrica. As tecnologias utilizadas para geração de energia elétrica a partir do syngas produzido no gaseificador podem ser motor de combustão interna, motor stirling, microturbinas e células a combustíveis, sendo que o motor de combustão interna apresenta maior maturidade tecnológica e comercial (LORA, 2006) e, comparado aos demais, menor custo por kw (CHAVES, 2016).

## 2.5 Geração Distribuída

O conceito de geração distribuída não é consensual dentre os autores da literatura. Em seu artigo, (ACKERMANN, 2001) faz uma revisão da literatura quanto à definição de GD segundo diferentes aspectos, tais como: localização, potência instalada, tecnologia, modo de operação e impacto ambiental e define geração distribuída como geração de energia elétrica próxima ao consumidor dentro da rede de distribuição.

A principal vantagem relacionada ao emprego da geração distribuída é a redução de perdas associadas à transmissão da energia elétrica, que não é necessária pois é gerada no próprio local de consumo. As demais vantagens podem ser destacadas com a qualidade e confiabilidade da energia gerada, pois o sistema não aceita variação de tensão ou frequência, atendimento conforme a demanda e diminuição da dependência do parque gerador (BARBOSA;AZEVEDO, 2013).

No Brasil, o setor de geração distribuída é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que, em sua Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012 estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. Segundo as definições da resolução, microgeração distribuída é uma central geradora com potência instalada menor ou igual a 75kW e para minigeração distribuída é entre  $75\text{kW} < x < 5\text{MW}$ . A compensação de energia elétrica é definida como *"sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa"*.

## 2.6 Estado da Arte

Estudos e experimentos mostraram sistemas de gaseificação para geração de energia elétrica em pequena escala com resultados satisfatórios.

Com o objetivo de avaliar a viabilidade de se aplicar o sistema em localidades distantes, (FIGUEIREDO, 2012) gaseificou lenha de eucalipto em um sistema de gaseificador downdraft e motor de combustão interna acoplado a um gerador de 50kVA. A produção de syngas conseguiu suprir a demanda máxima do gerador (26,4kW), consumindo aproximadamente 49,6 kg/h de biomassa.

Utilizando um sistema com gaseificador downdraft e motor com ignição por faísca acoplado a um gerador alimentado por lascas de madeira, (CHAVES, 2016) obteve uma eficiência no processo de gaseificação de 60-70%, decaindo para 4,5-17% de eficiência na geração elétrica, devido ao poder calorífico da biomassa e à eficiência térmica do motor.

Em um gaseificador downdraft de bancada com um motor à gas natural modificado

para usar o syngas, (YOON, 2012) alimentou 40-60kg/h de casca de arroz e ar como agente oxidante, conseguindo gerar 10kW.

Com sistema de gaseificação de 100kWe conectado à rede, (DASAPPA, 2011) realizou experimento operacional composto por reator downdraft, sistema de resfriamento e limpeza dos gases e grupo moto-gerador. O sistema operou por 1000h, consumindo 107kg/h de biomassa, gerando uma energia total de 80,6MWh com eficiência de aproximadamente 18%.

## 3 Materiais e Métodos

A análise do sistema foi feita de forma quantitativa por meio de estudo experimental, em que foi realizada a montagem de um aparato experimental e a coleta de dados deste experimento visando analisar o consumo do motor com três diferentes configurações, sendo elas: motor operando somente com gasolina, motor acoplado a um gaseificador operando a topo aberto e a topo fechado, bem como a análise energética do sistema dada pela energia térmica do gás de síntese que pode ser convertida em trabalho de eixo ou energia elétrica.

### 3.1 Aparato experimental

Para a alimentação do motor com o gás de síntese proveniente da gaseificação do bagaço de cana, foi montado um aparato experimental composto por um reator, um sistema de resfriamento dos gases e um motor de combustão interna na configuração do gaseificador a topo aberto. A topo fechado, foi adicionado ao aparato um compressor a montante do reator.

O reator utilizado, visto na Figura 6, possui 125mm de diâmetro e 500mm de altura. Antes de sua utilização, foram realizadas soldas no seu corpo externo para reparo do material, que tinha fundido. Adicionou-se argamassa refratária na parte interna para evitar transferência de calor com o meio, reduzindo seu diâmetro interno de 150mm para 125mm. O isolamento térmico foi feito com lã de vidro e manta térmica envoltos por uma cinta térmica.



Figura 6 – Reator (Fonte: autoria própria).

Na saída do reator foi colocada uma mangueira que era resfriada em água à temperatura ambiente dentro de um galão de plástico. A água, além de resfriar o gás, condensou o alcatrão presente nele, este alcatrão se depositou nas paredes da própria mangueira. Este sistema e a mangueira com o alcatrão condensado podem ser vistos na Figura 7.

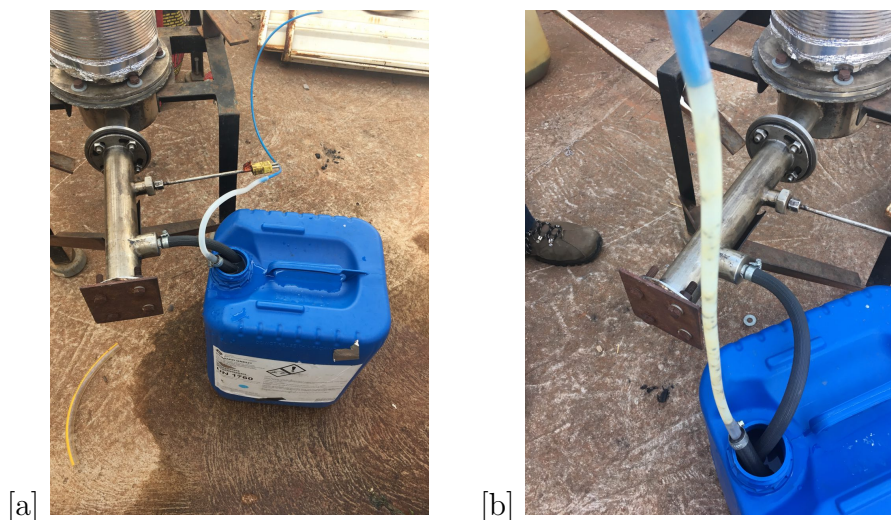


Figura 7 – a) Resfriamento do gás e condensação do alcatrão. b) Alcatrão condensado. (Fonte: autoria própria).

O fluxo de gás seguiu por outra mangueira até a entrada de ar do motor, que na Figura 8, é a mangueira azul. O motor utilizado foi um motor de combustão interna de um Fiat Palio 1.0 8V. Para que o reator trabalhasse em modo downdraft, o ar era puxado pelo vácuo do motor, dessa forma, causava-se uma depressão na saída do reator, fazendo com que o ar fosse puxado do topo, passasse pelo corpo deste servindo como agente oxidante das reações, e produzindo gás de síntese, que seguia o fluxo até o motor.

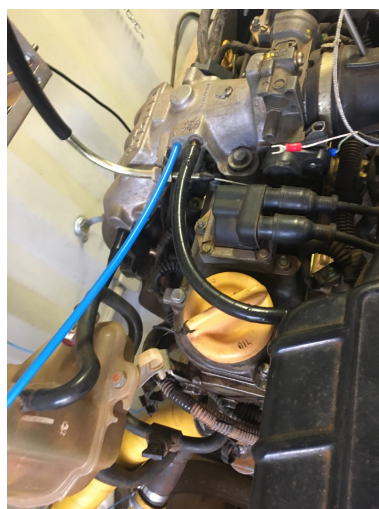


Figura 8 – Entrada do gás de síntese no motor. (Fonte: autoria própria)



## 3.2 Procedimento Experimental

Para preparar a biomassa para o experimento de gaseificação, cortou-se o bagaço de cana em pedaços, como mostra a Figura 9, e este foi deixado secando ao sol por mais de 30 dias. Separou-se, então, os bagaços em diferentes sacolas, cada uma com 100g, que foram pesadas com uma balança digital portátil.



Figura 9 – Biomassa preparada para gaseificação. (Fonte: autoria própria)

O experimento iniciou com a coleta de dados do motor funcionando apenas com gasolina através do software PC-SCAN 3000 USB. Foram coletados dados da rotação do motor, o tempo de injeção, a posição da borboleta e a pressão do coletor, dentre outros dados fornecidos pelo software.

Após coletados esses dados, deu-se início ao processo de gaseificação no reator com a adição, primeiramente, de carvão para dar ignição até que se atingisse a temperatura de gaseificação e entrasse em regime permanente. A partir de então, adicionavam-se 100 gramas de bagaço de cana medindo a altura da coluna no reator ocupada por ele e o tempo levado até que todo o bagaço inserido fosse consumido e transformado em gás de síntese. A alimentação do bagaço de cana foi realizada manualmente pelo topo do reator e foi feita até que fossem coletados os dados do motor operando a duplo combustível.

Depois de coletados os dados a topo aberto, adicionou-se 200g de biomassa, fechou-se o topo do reator e injetando ar com um compressor a montante do reator. Foi medida a vazão volumétrica do ar com um rotâmetro e coletados os dados do software.

### 3.3 Consumo do motor

O cálculo do consumo de combustível do motor pode ser feito pela equação 3.1.

$$C = \dot{Q} * t_i * N * 2\pi * 60 \quad [L/h] \quad (3.1)$$

Onde C é o consumo,  $\dot{Q}$  é a vazão volumétrica do bico de injeção do motor, que tem o valor de 169mL/min,  $t_i$  é o tempo de injeção e N é a rotação do motor.

### 3.4 Análise energética teórica

#### 3.4.1 Poder Calorífico do gás de síntese

De acordo com a metodologia de (TIANGCO, 1996), o poder calorífico do gás pode ser obtido através da equação 3.2.

$$PCI_{gás} = 5,9417 - 8,2893 * 10^{-3} * \psi \quad [MJ/Nm^3] \quad (3.2)$$

Onde  $\psi$  é a taxa específica de processamento de um reator, que pode ser obtida pela equação 3.3, e está compreendida entre os valores de 100 a 400 kg/m<sup>2</sup>h.

$$\psi = \frac{\dot{m}_{biomassa}}{A_g} \quad \left[ \frac{kg}{m^2 * h} \right] \quad (3.3)$$

Onde  $\dot{m}_{biomassa}$  é a vazão da biomassa, que pode ser obtida pela equação 3.4 e  $A_g$  é a área da seção transversal do gaseificador.

$$\dot{m}_{biomassa} = \frac{A_g * h_b * \rho_{ap}}{t} \quad [kg/h] \quad (3.4)$$

Onde  $h_b$  é a altura do leito consumido,  $\rho_{ap}$  é a massa específica aparente do bagaço de cana medida com a massa de bagaço consumida pelo volume ocupado no reator e t é o tempo de consumo da biomassa.

#### 3.4.2 Potência do gás de síntese

A eficiência do gás frio, que sai do sistema de limpeza e entra no motor, é dada pela razão entre a potência do gás frio ( $\dot{E}_{syngas}$ ) sobre a potência do combustível que entra no sistema  $\dot{E}_{biomassa}$ . Portanto, a potência do gás de síntese pode ser dado pela equação 3.5

$$\dot{E}_{syngas} = \eta_{gásfrio} * \dot{E}_{biomassa} \quad (3.5)$$



Também segundo (TIANGCO, 1996), esta eficiência também pode ser obtida através da equação 3.6

$$\eta_{\text{gásfrio}} = \frac{1}{\dot{E}_{\text{biomassa}}} (17,8627 - \frac{930,7079}{\psi} - 0,0231\psi) \quad (3.6)$$

A  $\dot{E}_{\text{biomassa}}$  é obtida através da equação 3.7, onde o  $PCI_{\text{biomassa}}$  será utilizado conforme revisão da literatura encontrada na tabela 1, uma vez que o bagaço de cana é uma biomassa já amplamente estudada.

$$\dot{E}_{\text{biomassa}} = \dot{m}_{\text{biomassa}} * PCI_{\text{biomassa}} \quad (3.7)$$

### 3.4.3 Eficiência

A eficiência energética de um motor a combustão leva em conta diversas perdas na conversão da energia, tais como a conversão da energia do combustível em energia térmica e desta em trabalho mecânico. A eficiência total para um motor a combustão, portanto, pode ser calculada pela equação 3.8, onde  $\eta_t$  é a eficiência térmica e  $\eta_m$  é a eficiência mecânica (BRUNETTI, 2012).

$$\eta_{\text{motor}} = \eta_t * \eta_m \quad (3.8)$$

Para um moto-gerador, além das eficiências supracitadas, consideram-se as perdas na conversão da energia mecânica em energia elétrica no gerador, dada pela eficiência do gerador  $\eta_g$ . A eficiência total para um moto-gerador pode ser calculada pela equação 3.9

$$\eta_{\text{moto-gerador}} = \eta_{\text{motor}} * \eta_g \quad (3.9)$$

### 3.4.4 Potência de eixo e Potência elétrica

A eficiência da conversão energética de uma máquina pode ser dada pela razão da potência ou energia que foi gerada sobre a potência ou energia de entrada. Portanto, para um motor e um moto-gerador, as potência de eixo e elétrica, que são as potências geradas, podem ser calculadas pelas equações 3.10 e 3.11, respectivamente (BRUNETTI, 2012).

$$P_w = \dot{E}_{\text{syngas}} * \eta_{\text{motor}} \quad [W] \quad (3.10)$$

$$P_e = \dot{E}_{\text{syngas}} * \eta_{\text{moto-gerador}} \quad [W] \quad (3.11)$$

## 4 Resultados e Análise dos Resultados

### 4.1 Consumo de Combustível

A tabela 3 apresenta os resultados do experimento com o motor operando somente com gasolina, a duplo combustível com o gaseificador a topo aberto e a topo fechado.

Tabela 3 – Resultados do experimento.

Combustível	Rotação do Motor (rpm)	Tempo de Injeção (ms)	Posição da Borboleta (graus)	Pressão Coletor (mmHg)	Consumo (L/h)
Gasolina	926	0,52	14	388	$1,63 \times 10^{-1}$
	969	0,55	14	355	$1,80 \times 10^{-1}$
	984	0,53	14	352	$1,76 \times 10^{-1}$
	3597	0,54	24	283	$6,57 \times 10^{-1}$
	4007	0,44	24	460	$5,96 \times 10^{-1}$
	4038	0,68	24	470	$9,28 \times 10^{-1}$
	4046	0,49	24	271	$6,70 \times 10^{-1}$
	4056	0,66	24	259	$9,05 \times 10^{-1}$
	4061	0,66	24	450	$9,06 \times 10^{-1}$
	4071	0,65	24	259	$8,94 \times 10^{-1}$
	4107	0,68	24	259	$9,44 \times 10^{-1}$
Gasolina + syngas (Topo aberto)	3532	0,49	24	283	$5,85 \times 10^{-1}$
	3579	0,48	24	280	$5,81 \times 10^{-1}$
	3656	0,49	24	280	$6,06 \times 10^{-1}$
	3838	0,61	24	259	$7,91 \times 10^{-1}$
	4009	0,68	24	259	$9,08 \times 10^{-1}$
	4021	0,67	24	262	$9,11 \times 10^{-1}$
	4035	0,65	24	259	$8,86 \times 10^{-1}$
	4038	0,64	24	259	$8,74 \times 10^{-1}$
	4047	0,64	24	259	$8,75 \times 10^{-1}$
	4061	0,65	24	259	$8,92 \times 10^{-1}$
	4162	0,68	24	265	$9,57 \times 10^{-1}$
Gasolina + syngas (Topo fechado)	887	0,65	14	409	$1,95 \times 10^{-1}$
	893	0,65	14	466	$3,68 \times 10^{-1}$
	926	0,88	14	388	$2,75 \times 10^{-1}$
	927	0,71	14	415	$2,22 \times 10^{-1}$
	2767	0,81	22	301	$7,58 \times 10^{-1}$
	2794	0,50	22	301	$4,72 \times 10^{-1}$
	2805	1,02	22	298	$9,67 \times 10^{-1}$
	2858	0,52	22	289	$5,02 \times 10^{-1}$
	2868	0,68	23	301	$6,59 \times 10^{-1}$
	2875	0,63	22	289	$6,12 \times 10^{-1}$
	3026	0,81	23	292	$8,28 \times 10^{-1}$

A figura 10 mostra um gráfico representando o consumo do motor com as diferentes configurações de combustível analisadas.

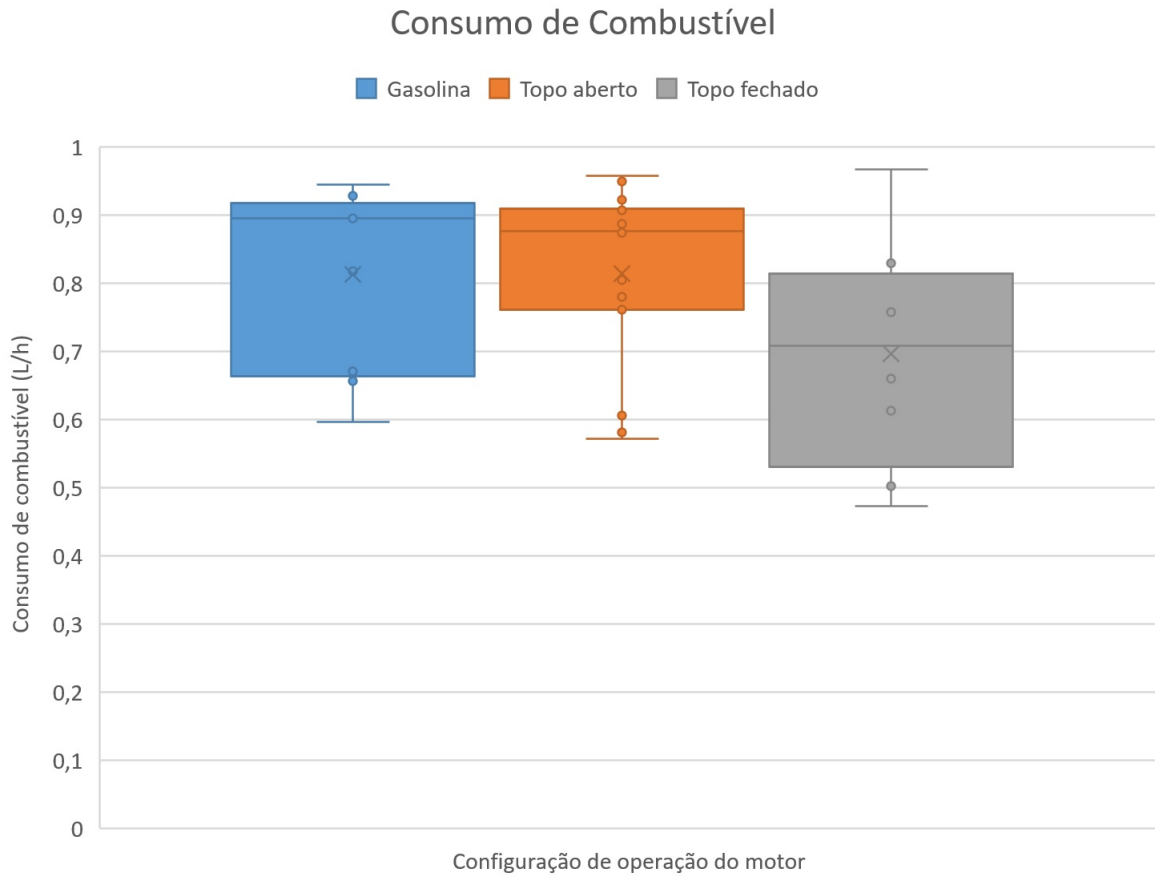


Figura 10 – Consumo de Combustível

Trabalhando a duplo combustível com topo aberto, o abatimento no consumo de gasolina com a adição do gás de síntese foi de 0,13%. Ao pressurizar o sistema trabalhando com o topo fechado, essa diferença de consumo se mostra mais evidente, chegando a uma redução de 14,4%.

Esse resultado insatisfatório do gás de síntese no consumo do motor pode ser explicado pela perda de carga na mangueira de entrada de gases, uma vez que esta apresentava diâmetro muito pequeno e, de acordo com a fórmula de Darcy-Weibasch, a perda de carga e o diâmetro da tubulação são inversamente proporcionais, ou seja, quanto menor o diâmetro, maior a perda de carga.

$$h_f = f_d \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (4.1)$$

Onde  $f_D$  é o coeficiente de atrito,  $L$  é o comprimento,  $D$  é o diâmetro,  $\rho$  é massa específica e  $V$  é a velocidade.

## 4.2 Geração de Energia

A tabela 4 mostra o resultado dos cálculos realizados com os dados coletados durante o experimento. Considerou-se os cálculos com 200 gramas de biomassa a topo fechado consumida durante o tempo  $t$  ocupando metade da altura do reator.

Tabela 4 – Cálculos realizados com os dados coletados.

Variável	Símbolo	Valor	Equação
Área da seção transversal	$A_g$	0,01227m <sup>2</sup>	-
Altura da coluna de biomassa	$h_b$	0,25m	-
Massa específica aparente	$\rho_{ap}$	65,2 kg/m <sup>3</sup>	-
Tempo de consumo da biomassa	$t$	9min ou 0,15h	-
Vazão mássica de biomassa	$\dot{m}_{biomassa}$	1,33 kg/h	Eq. 3.4
Taxa específica de processamento do reator	$\psi$	105 kg/m <sup>2</sup> h	Eq. 3.3
Poder Calorífico do syngas	$PCI_{syngas}$	5,07 MJ/Nm <sup>3</sup>	Eq. 3.2
Potência da biomassa	$\dot{E}_{biomassa}$	6945 W	3.7
Eficiência do gás	$\eta_{gás\ frio}$	35%	3.6
Potência do syngas	$\dot{E}_{syngas}$	2431 W	Eq. 3.5

Segundo (BRUNETTI, 2012), a máxima eficiência térmica de um motor de combustão interna é a eficiência do ciclo de Carnot para as condições máximas e mínimas de temperatura neste tipo de motor, resultando numa eficiência máxima de 57,2%. Com base nas equações 3.10 e 3.11, traça-se um gráfico com as potências de eixo e potência elétrica que podem ser geradas em função da eficiência e da potência térmica do syngas, assumindo eficiências entre 10% e 60% para  $\eta_{motor}$  e 90% para  $\eta_g$ .

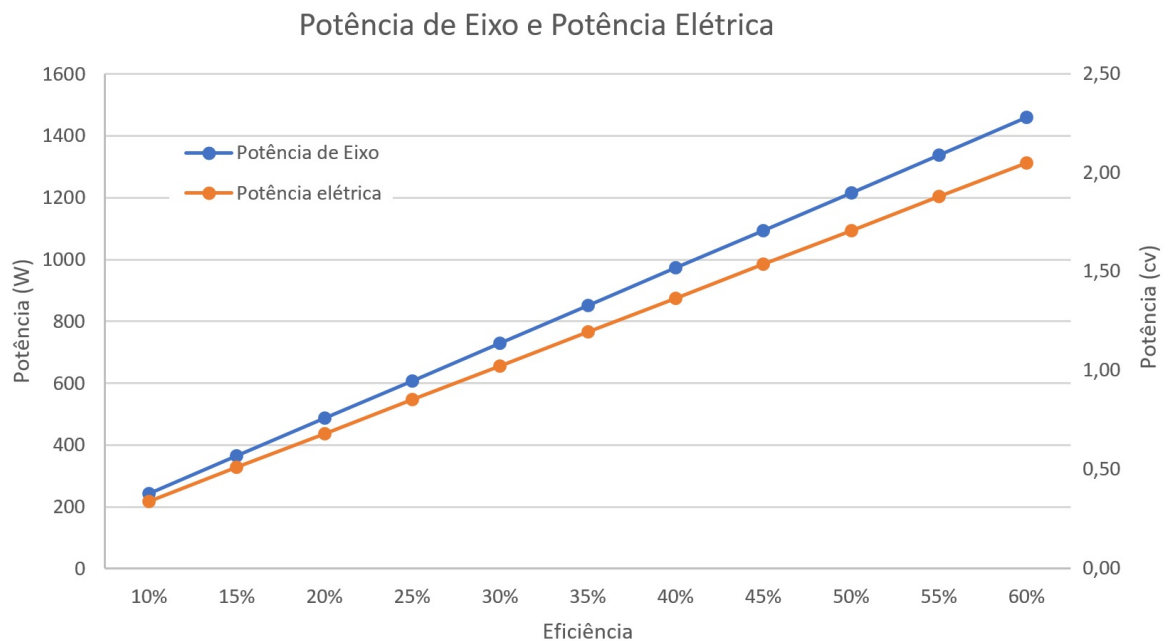


Figura 11 – Gráfico das potências de eixo e elétrica.

Portanto, um motor a combustão genérico com eficiência de até 57%, trabalhando com gás de síntese do bagaço de cana com uma potência térmica de 2.431 W, sem considerar as demais perdas do sistema, seria capaz de movimentar uma moenda de cana de até 1,8cv acoplada ao seu eixo. Acoplando um gerador, o conjunto moto-gerador supriria um motor elétrico de até 1,7cv.

Na tabela 5, seguem as especificações de diferentes modelos de moenda da marca Maqtron, de acordo com seu catálogo.

Tabela 5 – Tabela de moendas de cana marca Maqtron (MAQTRON, 2016)

Modelo Moenda	Motor elétrico indicado [CV]	Motor estacionário indicado [CV]
Cana Express Hobby	1/2	-
Cana Shop 60	1/2	-
Cana Shop 140	1	-
Cana Shop 200	2	-
Cana Shop Estacionária	-	3,5 - 5,0
B-721 Turbo	1,5 - 2,0	3,5
B-722 Turbo	1,2 - 2,0	3,5
M-700	1	-
B-728	1/2	-
B-723	1/2 - 1,0	-
B-730	5 a 7,5	8 a 12

Para esses modelos de moenda, seria necessário um motor a combustão com potência de eixo mínima de 3,5cv. Portanto, qualquer motor a combustão necessitaria trabalhar a duplo combustível para suprir a demanda de potência de tais moendas, uma vez que a energia do gás de síntese sozinho não é capaz de fornecer potência suficiente.

Um gerador acoplado ao motor seria capaz de suprir a demanda de potência de motores elétricos de oito das onze moendas da tabela 5, excetuando-se os modelos Cana Shop 200, Cana Shop Estacionária e B-730, estas necessitariam também que o motor trabalhasse a duplo combustível. Para moendas pequenas que demandam potência do motor elétrico de 1/2 cv, seria necessário um moto-gerador com eficiência mínima de 16,7%. Para aquelas de 1 cv, esta eficiência deveria ser de 33,5% e de 50,5% para as de 1,5cv.

A partir dos dados coletados, pôde-se calcular a potência de eixo que pode ser fornecida pelo motor a combustão utilizado neste experimento. Considerou-se para os cálculos os dados de gasolina quando o motor estava operando a duplo combustível com topo fechado. Uma vez que não há dados suficientes para avaliar a potência que pode ser gerada com o gás de síntese que de fato entrou no motor, considerou-se, para o syngas, os resultados teóricos calculados e expostos na tabela 3. Na tabela 6, vê-se o resultado da potência de eixo do motor com tais dados.

Tabela 6 – Resultados do motor utilizado

Variável	Valor
Consumo de gasolina médio	0,696 L/h
Massa específica gasolina	720 kg/m <sup>3</sup>
Vazão mássica de gasolina	0,501 kg/h
Poder Calorífico Inferior gasolina	43 MJ/kg
Potência térmica gasolina	5,985 kW ou 8 cv
Potência térmica syngas	2,431 kW ou 2,3 cv
Eficiência máxima de um MCI	57%
Potência de eixo gasolina	3,41 kW ou 4,6 cv
Potência de eixo syngas	1,385 kW ou 1,9 cv
Potência de eixo total	4,8 kW ou 6,5 cv

Trabalhando a duplo combustível, somente a parcela de gasolina já é capaz de fornecer potência necessária para movimentar as moendas de cana da tabela 5, exceto a de modelo B-730. Ao acoplar um gerador a esse motor, a potência fornecida ao motor elétrico seria de 5,8 cv, considerando os dois combustíveis, o que também supriria a demanda das moendas da tabela.

### 4.3 Análise Financeira

A análise financeira será realizada através de uma análise teórica em que um gerador de energia elétrica com eficiência de 90% seria acoplado ao motor utilizado no experimento e injetaria energia elétrica na rede de distribuição.

Fez-se levantamento de dados de uma pastelaria situada no setor central da cidade do Gama, DF. Foi anotado quais eram os equipamentos elétricos utilizados no estabelecimento e suas respectivas especificações técnicas, bem como o tempo que ficam ligados, esses resultados encontram-se na tabela 7. A pastelaria funciona das 8h às 17hs de terça a domingo e gera aproximadamente 15kg de bagaço por dia, a moenda utilizada no estabelecimento é o modelo CanaShop 140.

Tabela 7 – Dados dos equipamentos elétricos da pastelaria.

Quantidade	Equipamento	Potência (W)	Horas (h)	Consumo mensal (kWh/mês)
1	Moenda de Cana	735 W	9	158,8
1	Fritadeira elétrica	2500	9	540
2	Freezer	500	9	216
1	Geladeira	300	9	64,8
1	Cilindro de massa	735	9	158,8
1	Estufa para salgados	200	9	43,2
1	Microondas	1000	2	48
<b>Consumo mensal total</b>				<b>1.230 kWh/mês</b>

Segundo site da ANP, o preço da gasolina para o estado do Distrito Federal no mês de junho é de R\$ 4,40 (ANP, 2018). Segundo a CEB, a tarifa de energia para o grupo A referente aos consumidores comerciais em bandeiras verde e vermelha são, R\$ 0,53/kWh e R\$ 0,75/kWh, respectivamente (CEB, 2018). Portanto, os custos mensais da pastelaria com energia elétrica antes e após a inserção do sistema de gaseificação proposto podem ser vistos na tabela 8.

A energia elétrica mensal produzida pelo sistema de gaseificação proposto é de 854kWh/mês, segundo cálculo resultante da equação abaixo.

$$\text{Energia produzida} = \text{Potência de eixo total} * \eta_g * \text{horas mensais}$$

$$\text{Energia produzida} = 4,8\text{kW} * 0,9 * 216\text{h/mês}$$

$$\text{Energia produzida} = 933 \text{ kWh/mês}$$

Tabela 8 – Custos de energia com e sem o sistema de gaseificação.

Consumo de gasolina	Consumo de gasolina mensal	Preço da gasolina	Custo mensal da gasolina
0,696L/h	150L/mês	R\$ 4,40/L	R\$ 660,00
Energia elétrica consumida sem sistema de gaseificação	Bandeira Verde		Custo Mensal Total
	Tarifa	Custo Mensal	
	R\$ 0,53/kWh	R\$ 651,90	R\$ 651,90
	Bandeira Vermelha		Custo Mensal Total
1230 kWh/mês	Tarifa	Custo Mensal	
	R\$ 0,75/kWh	R\$ 922,50	R\$ 922,50
Energia elétrica consumida com sistema de gaseificação	Bandeira Verde		Custo Mensal Total
	Tarifa	Custo Mensal	
	R\$ 0,53/kWh	R\$ 157,41	R\$ 817,41
	Bandeira Vermelha		Custo Mensal Total
297 kWh/mês	Tarifa	Custo Mensal	
	R\$ 0,75/kWh	R\$ 222,75	R\$ 882,75

O custo mensal total de energia elétrica consumida com sistema de gaseificação é a soma do custo da energia elétrica mais o custo mensal da gasolina utilizada no motor a combustão.

Ao introduzir o sistema de gaseificação, o custo mensal aumenta 20,25% em bandeira verde e reduz 4,31% em bandeira vermelha. Este aumento em bandeira verde se deve ao alto preço por litro da gasolina, uma vez que esta fonte energética está sendo responsável por 80,7% do custo total mensal. Portanto, em meses em que a tarifa está em bandeira vermelha, o sistema de gaseificação é viável economicamente, mesmo que com uma baixa redução no custo.

Para que também haja viabilidade econômica em bandeira verde, é necessário que o preço por litro da gasolina seja, no máximo, R\$ 3,29/L. Mantendo-se o atual preço da gasolina, a viabilidade também seria possível em um sistema em que a inserção do gás de síntese reduzisse em, pelo menos, 60,7% o consumo de gasolina no motor, passando de 0,814L/h para 0,32L/h. Neste caso, o custo mensal em bandeira verde não se alteraria, e a redução do custo em bandeira vermelha seria maior, com 13,7%, como pode ser visto na tabela 9. Em um cenário em que o motor trabalhasse apenas com o gás de síntese, a redução na conta de energia elétrica da pastelaria seria de 38,4%.

Tabela 9 – Custos de energia com redução no consumo de gasolina.

Consumo de gasolina	Consumo de gasolina mensal	Preço da gasolina	Custo mensal da gasolina
0,289L/h	62,4L/mês	R\$ 4,40/L	R\$ 274,67
Energia elétrica consumida sem sistema de gaseificação	Bandeira Verde		Custo Mensal Total
	Tarifa	Custo Mensal	
	R\$ 0,53/kWh	R\$ 651,90	R\$ 651,90
	Bandeira Vermelha		Custo Mensal Total
1230 kWh/mês	Tarifa	Custo Mensal	
	R\$ 0,75/kWh	R\$ 922,50	R\$ 922,50
Energia elétrica consumida com sistema de gaseificação	Bandeira Verde		Custo Mensal Total
	Tarifa	Custo Mensal	
	R\$ 0,53/kWh	R\$ 347,51	R\$ 651,64
	Bandeira Vermelha		Custo Mensal Total
655 kWh/mês	Tarifa	Custo Mensal	
	R\$ 0,75/kWh	R\$ 491,76	R\$ 795,9

Para um usuário que não tenha acesso à rede de distribuição de energia e deseje acoplar ao sistema de gaseificação apenas a fritadeira elétrica, a moenda de cana e o cilindro de massa, o sistema seria viável economicamente, tendo em vista que houve redução no consumo de gasolina e, portanto, também haverá redução de 14,7% no custo mensal.



## 5 Conclusão

O gás de síntese gerado pela gaseificação do bagaço de cana neste experimento acarretou em baixas porcentagens de redução no consumo de gasolina do motor utilizado, e uma redução quase nula quando o reator trabalhava a topo aberto.

Para que o motor possa apresentar redução mais significativa no consumo de combustível, é necessário que seja montado um aparato experimental com menos perda de carga. Para isso, sugere-se que, ao invés de utilizar o vácuo do motor para causar a depressão na saída do reator, pode-se construir um tubo venturi na entrada de admissão de ar do motor com um orifício maior, o que poderá reduzir a perda de carga. Com o Venturi, a velocidade do ar aumentará na região da garganta do mesmo, causando a depressão necessária e succionando o gás de síntese.

Em uma análise teórica e desprezadas as perdas de acoplamento do sistema de limpeza ao motor, a potência térmica do gás de síntese gerado apresentou valor satisfatório para geração de energia elétrica em moendas de pequeno porte de até 1,7 cv.

O sistema de gaseificação montado é viável tecnicamente, pois tem condições de fornecer potência suficiente para moendas de diferentes modelos com o motor trabalhando a duplo combustível, sendo o motor acoplado tanto diretamente ao eixo da moenda como acoplado a um gerador elétrico.

Este sistema, porém, não é viavelmente economicamente para geração distribuída de energia elétrica quando a tarifa está em bandeira verde devido ao alto preço da gasolina, pois esta aumenta o custo mensal de consumo de energia, mas é viável quando a tarifa está em bandeira vermelha.

Para que possa haver uma análise mais realista e com possíveis melhores resultados na participação do gás de síntese na conversão da energia deste sistema de gaseificação, devem ser feitos os ajustes na configuração do aparato experimental, visando uma diminuição na perda de carga do sistema, tendo em vista que o objetivo é o incentivo ao uso da biomassa como fonte energética.

## Referências

- ACKERMANN et al;. Distributed generation: a definition. Elsevier Electric Power Systems Research 57 (2001) 195–204, 2001. Citado na página 26.
- ANP. Síntese dos preços praticados - resumo i - gasolina. Disponível em: <[http://anp.gov.br/preco/prc/Resumo\\_Por\\_Estado\\_Municipio.asp](http://anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp)>, Distrito Federal, 2018. Citado na página 38.
- BARBOSA;AZEVEDO. Geração distribuída: Vantagens e desvantagens. II Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia, 2013. Citado na página 26.
- BASU, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis, Pratical Design and Theory*. [S.l.]: Elsevier Inc, 2010. ISBN 978-0-12-374988-8. Citado 8 vezes nas páginas 10, 17, 19, 21, 22, 23, 24 e 25.
- BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chemical Engineering Journal, Vol.91, pp 87-102, 2003. Citado na página 21.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna - Volume 1*. [S.l.]: Edgar Blucher Ltda, 2012. ISBN 978-85-212-0708-5. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 35.
- CEB. Tarifas. Disponível em: <<http://www.ceb.com.br/index.php/component/phocadownload/category/27-tarifas>>, Distrito Federal, 2018. Citado na página 38.
- CHAVES et al;. Small-scale power generatio nanalysis:downdraft gasifier coupled to engine generator set. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Science Direct, Parana, Brasil, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 17, 19, 24, 25 e 26.
- CORTEZ, L. et al;. *Biomassa para energia*. São Paulo: Editora Unicamp, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21.
- DASAPPA et al;. Operational experience on a grid connected 100 kwe biomass gasification power plant in karnataka, india. Elsevier Energy for Sustainable Development 15 (2011) 231–239, 2011. Citado na página 27.
- FIGUEIREDO et al;. Produção de energia elétrica através da biomassa em sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50 kva. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, 2012. Citado na página 26.
- HASLER;NUSSBAUMER. Gas cleaning for ic engine applications from fixed bed biomass gasification. Biomass and Bioenergy, 1999. Citado na página 25.
- HIGMAN;BURGT. *Gasification*. [S.l.]: GPP, Second Edition, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- KHAN, F. et al;. Demonstrating fuel flexibility in commercial operation. International Journal of Clean Coal and Energy, Houston, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 23.
- LENÇO, P. C. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia. Universidade Estadual de Campinas Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 20.

- LORA et al.; Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa. Encontro de Energia Meio Rural, Itajaúba, Minas Gerais, 2006. Citado na página 25.
- MANDL, C. et al.; Updraft fixed-bed gasification of softwood pellets: Mathematical modelling and comparison with experimental data. Proceedings of the 17th European Biomass Conference and Exhibition, June/July 2009, Hamburg, ETA-Renewable Energies (Ed.), Itália, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 22.
- MAQTRON, V. Moendas de cana. Disponível em: <[http://www.vencedoramaqtron.com.br/downloads/catalogos/maqtron\\_catalogo\\_linha\\_moendas\\_de\\_cana%202017\(FOLHAS\).pdf](http://www.vencedoramaqtron.com.br/downloads/catalogos/maqtron_catalogo_linha_moendas_de_cana%202017(FOLHAS).pdf)>, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 36.
- MME. *Resenha energética brasileira. Exercício de 2016*. Brasília, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 16.
- REED, T. B. *Handbook of Biomass Gasification*. Golden, Colorado: The Biomass Energy Foundation Press, 1988. Citado na página 23.
- RENDEIRO et al.; *Combustão e Gaseificação de Biomassa sólida. Soluções Energéticas para a Amazônia*. Brasília: Ministério de Minas e Energia. 1a edição, 2008. ISBN 978-85-98341-05-7. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 25.
- SANCHEZ, C. g. *Tecnologia da gaseificação de biomassa*. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 20, 22 e 23.
- SILVA;MORAIS. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, 2008. Citado na página 23.
- SUSASTRIAWN et al.; Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. Elsevier. Renewable and Sustainable Energy Reviews 76 (2017) 989–1003, 2017. Citado na página 24.
- TIANGCO et al.; Optimum specific gasification rate for static bed rice hull gasifiers. Biomass nd Bioenergy Vol. 11, No. 1. pp. 51-62, Inglaterra, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- WANG, P. et al.; Slag behavior in gasifiers. part i: Influence of coal properties and gasification conditions. Energies 2013, 6(2), 784-806; doi:10.3390/en6020784, Pittsburgh, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 23.
- YOON et al.; Operational experience on a grid connected 100 kwe biomass gasification power plant in karnataka, india. Elsevier Energy for Sustainable Development 15 (2011) 231–239, 2012. Citado na página 27.